

# Research on Database Interaction Optimization of Distributed System of Tobacco Machinery Host

Xinzhe Wang Zhi Li

Shanghai Tobacco Machinery Co., Ltd., Shanghai, 200120, China

## Abstract

With the accelerated digitalization and intelligent transformation in tobacco manufacturing, distributed host computer systems have become increasingly vital for production control and data exchange. As the central hub for equipment information, the host computer's database interaction performance directly impacts system responsiveness and data synchronization efficiency. Traditional centralized architectures face challenges such as transaction latency and consistency maintenance difficulties, which hinder system coordination. This study develops an optimized model integrating multi-level caching, asynchronous transaction queues, and message middleware. The research focuses on architectural design, data transmission, and load balancing, with validation conducted in cigarette packaging workshops. Results demonstrate that this model significantly enhances concurrent processing capabilities and response speed, providing an efficient and reliable database interaction solution for intelligent manufacturing in tobacco machinery.

## Keywords

tobacco machinery; host system; distributed database; data interaction optimization; caching mechanism; transaction consistency

# 烟草机械上位机分布式系统数据库交互优化研究

王新喆 黎志

上海烟草机械有限责任公司, 中国·上海 200120

## 摘要

随着烟草制造业数字化与智能化进程加快, 分布式上位机系统在生产控制与数据交互中的作用日益凸显。上位机作为设备信息枢纽, 其数据库交互性能直接影响系统响应与数据同步效率。传统集中式架构存在事务延迟与一致性维护困难等问题, 制约系统协同。本文构建了融合多级缓存、异步事务队列与消息中间件的优化模型, 从架构设计、数据传输与负载均衡等方面展开研究, 并在卷包车间进行验证。结果表明, 该模型显著提升并发处理能力与响应速度, 为烟草机械智能制造提供了高效可靠的数据库交互方案。

## 关键词

烟草机械; 上位机系统; 分布式数据库; 数据交互优化; 缓存机制; 事务一致性

## 1 引言

在烟草制造业信息化生产体系中, 上位机系统承担设备监控、数据采集与控制指令下发等核心任务。随着卷包等环节自动化水平提升, 分布式上位机逐渐取代单机控制, 实现多节点并行与协同控制, 但也带来了数据库交互频繁和数据一致性维护困难的问题。由于生产数据实时性强、并发量大、结构复杂, 传统集中式数据库已难以满足高性能与高可靠需求。为此, 本文提出一种融合缓存优化、消息队列与异步事务处理的数据库交互优化方案, 通过结构重构与算法改进, 显著提升系统的响应速度与数据一致性, 为烟草机械智能制造中的上位机分布式系统提供高效、可扩展的技术路径。

【作者简介】王新喆(2000-), 男, 本科, 从事自动化研究。

## 2 烟草机械上位机分布式系统特征分析

### 2.1 系统架构与功能定位

烟草机械上位机系统在分布式生产环境中承担数据采集、过程监控与智能控制的核心角色。系统整体由设备层、通信中间层与数据处理层构成, 形成“采集—传输—分析—决策”的闭环结构。设备层以 PLC、传感器和执行单元为基础, 负责实时采集关键工艺参数; 通信中间层通过工业总线、OPC UA 及消息队列协议, 实现设备节点与服务器之间的高效数据传输; 数据处理层则集中完成数据库存储、事务管理与统计分析任务。分布式架构使各上位机节点既能独立完成任务, 又能通过数据库交互实现工艺参数的全局共享与协同控制。系统运行过程中, 大量设备需实时上传状态信息, 这对数据库的吞吐量与响应速度提出了极高要求。若交互机制设计不当, 易引发锁竞争、I/O 瓶颈及事务延迟, 严重影响生产节拍与数据同步效率。

## 2.2 数据交互的实时性与一致性需求

烟草机械的连续生产特性决定了其数据交互必须具备高实时性与严格一致性。系统需快速响应工艺参数变化，保证控制调节与报警处理的即时性。实时性不足将导致控制滞后，进而影响生产质量与能耗优化。同时，一致性维护是系统可靠运行的关键，任何写入延迟或数据冲突都可能造成工艺参数错配，触发控制异常。分布式数据库架构下，多节点并发写入与同步更新极易导致主从延迟、写冲突或部分数据覆盖，因此必须引入高效的事务隔离机制、全局时间戳控制及双向同步策略，确保在高并发情况下数据的一致性与完整性。通过优化分布式事务模型与异步校验机制，可在提升系统并发处理能力的同时，保证工艺数据的准确同步与决策层数据的实时可用。

## 2.3 传统架构的瓶颈与限制

目前多数烟草机械生产系统仍依赖单节点数据库架构。该架构虽然在单机控制阶段能满足基础需求，但在分布式上位机体系中暴露出明显瓶颈。集中式事务处理模型导致并发写入冲突频繁，事务锁等待时间增加；当设备数量和数据量激增时，数据库 I/O 带宽与 CPU 资源均成为限制性能的主要因素。部分企业尝试通过主从复制或分库分表方案提升性能，但依旧存在读写不均衡、负载集中过高和同步延迟等问题。尤其在网络环境复杂的车间现场，集中式数据库容易因网络抖动或节点断连造成数据丢失或任务中断，难以支撑持续运行的工业生产需求。由此可见，传统架构已难以满足烟草机械上位机分布式系统在高并发、低延迟与高可靠性条件下的数据库交互需求，亟需从架构层面进行系统性优化与重构。

## 3 数据库交互优化总体设计

### 3.1 多级缓存体系的构建

针对烟草机械上位机系统中频繁的高并发读写访问问题，本文构建了基于 Redis 的多级缓存体系，以实现数据访问的分层优化与响应加速。系统根据数据访问频率与业务重要性将缓存划分为三级：一级缓存驻留于内存，用于存放高频访问数据，实现快速读取响应；二级缓存部署于共享内存或集群节点，用于存储中频数据，实现跨节点共享与快速查询；三级缓存则以数据库持久层为支撑，存放低频访问数据与历史记录。通过异步写入与延迟同步机制，系统在数据写入时先更新缓存，后台批量同步至主数据库，减少数据库直接访问压力。多级缓存机制有效提升了系统查询效率，降低了数据库资源占用率，在高峰时段保持稳定性能，缓解了分布式系统的访问瓶颈与响应延迟问题。

### 3.2 异步事务与消息队列融合机制

在分布式上位机系统中，设备节点的数据采集、加工与入库操作常处于高并发状态，传统同步事务处理在此场景下易出现锁等待与线程阻塞，严重影响系统性能。为此，

本文提出基于消息队列的异步事务融合机制。各节点将数据写入请求封装为标准化消息，交由中间件进行排队与缓冲处理。数据库后端以消费者方式批量接收消息，并采用异步提交方式执行事务。该机制显著降低了锁竞争，提高了事务并行度和数据库吞吐量。系统同时引入幂等性校验与事务日志追踪机制，确保在网络异常或消息重复投递情况下依然维持数据一致性与可靠恢复能力。该机制为高并发场景下的稳定运行提供了坚实支撑。

### 3.3 数据分片与负载均衡策略

为进一步优化分布式数据库的整体性能与可扩展性，系统采用基于 Hash 算法的数据分片策略，将数据分配至独立节点进行存储与处理。通过逻辑分区与物理分片相结合的方式，实现数据的并行查询与分布式存储，有效降低了单节点负载压力。在访问调度层，系统引入 Consistent Hashing 一致性哈希算法，通过反向代理实现请求的动态分配与负载均衡。当节点扩展或故障发生时，系统能够自动迁移部分数据，维持平衡的负载状态并保证业务连续性。分片与负载均衡机制有效提升了数据库整体吞吐量，缩短了查询响应时间，并在节点扩展时保持良好的扩展效果，支撑了烟草机械上位机系统在大规模分布式部署环境中的高可用性与高性能运行。

## 4 数据库交互优化关键技术实现

### 4.1 连接池与事务控制优化

在烟草机械上位机分布式系统中，数据库访问频率极高，传统的逐次建立连接模式造成频繁的资源分配与释放，增加了系统负载。为此，系统引入基于连接池技术的统一数据库访问接口，采用动态连接复用与空闲连接回收机制，使多线程请求能够在连接池中高效分配资源，显著降低连接建立的时间成本。事务处理方面，系统将复杂的大型事务拆解为多个可并发执行的小事务，并通过异步确认与延迟提交机制，在确保数据一致性的同时降低了锁竞争概率。针对高并发场景，事务调度模块采用优先级队列算法，对实时性强的生产控制事务优先处理。优化后的方案充分验证了连接池与细粒度事务管理在工业控制系统中的高效性与可扩展性。

### 4.2 分布式缓存一致性维护

多级缓存体系的引入有效分担了数据库访问压力，但也带来了缓存与主库间一致性维护的挑战。针对这一问题，系统设计了基于发布/订阅机制的分布式缓存同步方案。当数据库更新或事务提交完成后，消息队列立即向相关缓存节点发布更新通知，触发数据刷新流程，从而实现多节点数据状态的实时一致。对生产关键参数采用双写校验与版本号控制机制，防止缓存脏读或版本回退。对于网络延迟或节点故障导致的缓存失效，系统自动启动重同步机制，通过日志比对恢复最新数据状态。该方案在性能与一致性之间取得平衡，显著提升了系统在高并发场景下的数据稳定性，为烟草

机械上位机实时监测与指令传输提供了坚实支撑。

### 4.3 分布式日志与故障恢复机制

分布式环境下的节点故障与网络异常极易引发数据丢失与事务中断问题。为增强系统可靠性，本文设计了分布式日志与故障恢复机制。各数据库节点均设有本地事务日志模块，实时记录事务执行顺序、提交状态与数据快照，并通过中心协调器进行异步归档与索引维护。当节点出现故障时，协调器根据日志索引定位未完成事务，自动执行事务回放操作，实现断点续传。系统采用多副本日志冗余策略，确保在多节点同时故障情况下仍具备数据恢复能力。日志模块的分级写入策略有效降低了 IO 写入压力，使系统在故障恢复与稳定运行间取得平衡。该机制的引入显著提高了上位机分布式系统的容错性与业务连续性，为烟草制造生产的安全与稳定提供了关键保障。

## 5 应用实践与性能验证

### 5.1 卷包车间应用实例

在卷包生产线中，优化后的数据库交互架构率先投入试运行，涵盖多台上位机节点。系统在高并发数据采集与实时控制任务下表现出显著稳定性。通过异步事务队列和分布式缓存的协同运行，数据处理由串行转为并行批量执行，显著减少了数据库访问阻塞。多节点间数据同步精度达到工业控制要求，实现了高精度状态一致性。实践表明，该架构在保证实时性的同时，显著提升了卷包生产的连续性与设备协同效率，为后续模块化工艺优化提供了数据基础。

### 5.2 性能对比与评估

在对比实验中，优化后的分布式数据库架构在并发处理能力、响应延迟及可靠性方面均优于传统集中式模式。系统并发处理能力显著提升，数据库写入成功率达到工业级高标准。系统可靠性指标大幅提高，长周期运行无异常宕机记

录。数据一致性与事务完整性测试均满足工业控制要求。应用反馈显示，新架构有效降低了人工维护频次和停机检修时间，支持跨区域数据协同与远程监控需求，为烟草机械智能制造系统的持续运行提供了高可靠、高性能的数据基础设施保障。

## 6 结语

烟草机械上位机分布式系统的数据库交互优化，是实现生产线高效协同与数据智能管理的核心环节。本文通过多级缓存、异步事务与分片负载均衡等技术手段，构建了兼具高性能与高可靠性的交互架构。在卷包生产实践中，该系统有效解决了传统架构下的集中瓶颈、延迟积累与一致性维护难题，显著提升了工业控制系统的实时性与稳定性。未来研究可在现有基础上进一步引入 AI 自适应调度与时序预测机制，实现数据库访问动态优化与异常预测。同时，结合边缘计算与数字孪生技术，可实现数据层与控制层的深度融合，构建面向智能制造的高自治分布式上位机系统，为烟草行业的数字化转型与精益化生产提供持续动力。

### 参考文献

- [1] 王朝夕, 邓丽, 费敏锐, 等. 分布式自动化生产线控制系统中上位机与 PLC 之间的通信方法 [J]. 仪表技术, 2013,(11):24-28.
- [2] 晏小平, 谢亦三, 郑根发. 建立烟草薄片生产线的上位机与生产控制模型 [C]// 上海市烟草系统 2008 年度优秀学术论文集. 上海烟草(集团)公司上海卷烟厂; , 2009:64-74.
- [3] 姚伟. 液压站数据采集监控系统上位机软件设计 [J]. 工业控制计算机, 2025,38 (12):1-3.
- [4] 杨洋. 一种新型智能差示扫描量热仪 (DSC30) 的上位机系统软件设计与实现 [J]. 软件导刊, 2015,14 (07):145-149.
- [5] 李欢. 数字图像处理系统上位机系统设计 [D]. 大连海事大学, 2012.